

Сильнопольевая инжекционная модификация наноразмерных диэлектрических пленок в МДП-приборах

© В.В. Андреев, А.А. Столяров, Д.М. Ахмелкин, А.В. Романов

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, 248600, Россия

Проведено исследование процессов изменения зарядового состояния МДП-структур с многослойным подзатворным диэлектриком наноразмерной толщины на основе термической пленки SiO_2 , легированной фосфором, при сильнопольевой инжекционной модификации, проводимой при различных режимах инжекции. Выполнена оценка временной и температурной стабильности зарядового состояния диэлектрической пленки после модификации. Установлено, что отрицательный заряд, накапливающийся в пленке фосфорно-силикатного стекла (ФСС) в МДП-структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 -ФСС в процессе сильнопольевой туннельной инжекции электронов, может использоваться для модификации электрофизических характеристик приборов с такой структурой. Предложен способ модификации электрофизических характеристик МДП-структур путем сильнопольевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик в режиме протекания постоянного инжекционного тока. Способ позволяет непосредственно во время модификации контролировать изменение параметров МДП-структуры. Показано, что для получения приборов с высокой термостойкостью после модификации зарядового состояния инжекцией электронов их необходимо отжигать при температурах около 200 °С.

Ключевые слова: МДП-структура, наноразмерная диэлектрическая пленка, модификация, сильные электрические поля, инжекция, подзатворный диэлектрик.

Введение. Важной задачей современной микро- и нанoeлектроники является создание полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и других изделий, изготавливаемых на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), с возможностью корректировки параметров как в процессе, так и после их изготовления. Для реализации этой задачи необходима разработка специальных наноразмерных диэлектрических пленок, реализующих новые способы модификации их характеристик.

Новые диэлектрические пленки должны позволять изменять в широком диапазоне свое зарядовое состояние и сохранять эти изменения стабильными длительное время в процессе эксплуатации. Как было показано [1–3], в качестве таких диэлектрических пленок можно использовать многослойный диэлектрик на основе термической двуокиси кремния, пассивированной слоем фосфорно-силикатного

стекла (ФСС). Пленка ФСС толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров в таких структурах обычно формируется путем легирования термической пленки SiO_2 [1, 4–7]. Применение данного диэлектрика, с одной стороны, позволяет использовать на начальном этапе стандартный технологический процесс формирования КМДП-ИС, а с другой, — принять во внимание уже имеющиеся данные о процессах зарядовой деградации данных слоев в сильных электрических полях.

Основной проблемой при создании диэлектрических пленок для полупроводниковых приборов на основе МДП-структур, позволяющих управлять параметрами приборов путем инжекционной модификации после их изготовления, является создание требуемой оптимальной структуры диэлектрической пленки, обеспечивающей эффективный захват носителей заряда на ловушки и обладающей высокой инжекционной стойкостью и низкой зарядовой дефектностью [8–10]. Все это обуславливает необходимость комплексного и всестороннего исследования технологического процесса легирования пленки SiO_2 фосфором и самой структуры SiO_2 — ФСС с целью оптимизации параметров диэлектрической пленки, необходимой для МДП-приборов с инжекционной модификацией параметров.

В данной работе проведено исследование процессов изменения зарядового состояния МДП-структур с многослойным подзатворным диэлектриком наноразмерной толщины на основе термической пленки SiO_2 , легированной фосфором при сильнополевой инжекционной модификации, проводимой при различных режимах инжекции. Выполнена оценка временной и температурной стабильности зарядового состояния диэлектрической пленки после модификации.

Методика эксперимента и образцы. В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термической двуокиси кремния и термической двуокиси кремния, пассивированной пленкой фосфорно-силикатного стекла (ФСС), изготовленные на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$. Двуокись кремния толщиной 50...100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl . Пленку ФСС толщиной 9...30 нм формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси $\text{POCl}_3\text{—O}_2$ при температуре 900 °С. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС варьировали время загонки фосфора в пределах от 1,5 до 7 мин. Затем для окончательного формирования пленки ФСС в течение 15 мин пластины отжигали в атмосфере азота при температуре 1000 °С. Алюминиевые электроды площадью $1,5 \cdot 10^{-2}$ см² напыляли магнетронным методом. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °С. В результате были

изготовлены семь групп образцов со структурой Si—SiO₂—ФСС—Al, отличающиеся параметрами слоя ФСС, которые приведены в табл. 1. Технологический процесс диффузии фосфора контролировался по измерениям величины сопротивления растекания диффузионных слоев (ρ_s , Ом/□) [11], измеряемого четырехзондовым методом на пластинах-спутниках КДБ-7,5, легированных совместно с исследуемыми образцами. В результате использования различного времени загонки фосфора было получено пять групп образцов с сопротивлением растекания диффузионных слоев от 83 до 950 Ом/□ (табл. 1) [11, 12], что лежит в пределах рабочего диапазона этих значений в унифицированном технологическом процессе формирования подзатворного диэлектрика КМДП-ИС.

Величина подвижного заряда, измеренного по методу термополевой обработки ($T = 200$ °С; $V = +20$ В), для образцов всех групп не превышала $2 \cdot 10^{10}$ q/cm². Толщина пленки ФСС измерялась методом химического травления в селективном травителе (азотная кислота — 31 мл, фтористоводородная кислота — 46 мл, вода деионизованная — 923 мл). Толщина пленки ФСС определялась как разность толщины диэлектрической пленки (измеренной эллипсометрическим методом) до и после травления [11].

Таблица 1

Параметры пленки ФСС

Наименование параметра, единица измерения		Номер группы						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
1.	Время загонки фосфора, мин	1,5	2	3	4	5	6	7
2.	Сопротивление растекания диффузионного слоя ρ_s , измеренное на пластинах-спутниках КДБ-7,5, Ом/□	950	900	770	380	212	92	83
3.	Толщина слоя ФСС, измеренная методом травления, нм	9	11	13	18	22	27	30
4.	Концентрация фосфора, %	0,5	0,6	0,7	1,0	1,2	2,0	2,3
5.	Пространственное расположение центра заряда (начало отсчета — граница Si—SiO ₂) X, нм	92	91	90	87	86	84	82

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировали с использованием C—V метода и метода управляемой токовой нагрузки [13–15], заключавшегося в приложении к образцу импульса тока специальной формы, обеспечивающего заряд емкости МДП-структуры и по-

следующую сильнополевую туннельную инжекцию электронов в диэлектрик, обычно осуществляемую в режиме протекания постоянного тока. В течение сильнополевой инжекции измеряли приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_i , характеризующее изменение зарядового состояния МДП-структуры [13]. Контроль термополевой стабильности зарядового состояния МДП-структуры после модификации оценивали с помощью метода токов термостимулированной деполяризации (ТСД) [17] и релаксации $C-V$ характеристик в изотермических условиях при нескольких фиксированных температурах.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Легирование пленки подзатворного диэлектрика на основе термического диоксида кремния фосфором может применяться специально для стабилизации характеристик приборов [7] или возникать при использовании затворов из поликристаллического кремния, легированного фосфором [5, 18]. Наличие пленки ФСС существенно меняет характер изменения зарядового состояния МДП-структур при сильнополевой по Фаулеру — Нордгейму инжекции электронов в диэлектрик по сравнению со структурами на основе термической пленки SiO_2 , не легированной фосфором. Структурная модель фосфорносиликатного стекла, в которой постулировалось присутствие в пленке ФСС положительно и отрицательно заряженных групп, связанных с атомами фосфора, при общей электронной нейтральности стекла, была предложена в работе [7]. В соответствии с этой моделью отрицательно заряженные группы выступают в роли геттера подвижного положительного заряда (в основном связанного с наличием ионов щелочных металлов), тем самым стабилизируя электрические характеристики рабочих МДП-приборов.

Другой отличительной особенностью МДП-структур с двухслойным диэлектриком SiO_2 —ФСС при сильнополевой инжекции электронов является накопление отрицательного заряда в пленке ФСС [1–3, 6]. Согласно предположениям, сделанным в работах [6, 12], инжектированные в диэлектрик электроны захватываются положительно заряженными группами, присутствующими в пленке ФСС. Эти электронные ловушки, по-видимому, вносят основной вклад в величину накапливаемого отрицательного заряда в пленке ФСС и имеют сечение захвата $\sigma_1 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ [12, 19]. Как было показано в [19], помимо ловушек первого типа, в двухслойном диэлектрике SiO_2 —ФСС присутствуют электронные ловушки с сечением захвата $\sigma_2 = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, наблюдающиеся при инжекции электронов из Si, и электронные ловушки с сечением захвата $\sigma_3 = 7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, присутствующие при инжекции электронов из металлического затвора. В [19] было сделано предположение, что электронные ловушки с сечениями захвата σ_2 и σ_3 имеют одну физическую природу, а отличие в величине сечений захвата обусловлено

различием условий инжекции при изменении полярности токового импульса, а также различием в перераспределении внутренних электрических полей, связанных с накоплением отрицательного заряда в пленке ФСС. Одним из возможных объяснений появления электронных ловушек второго типа является воздействие молекул POCl_3 на структуру SiO_2 [4], в результате чего происходит перестройка структуры диоксида кремния вблизи границы раздела SiO_2 —ФСС, приводящая к появлению оборванных связей кислорода, которые могут выступать в роли электронных ловушек. Таким образом, учитывая ранее полученные экспериментальные данные [12, 19], кинетика накопления отрицательного заряда в МДП-структуре Si — SiO_2 —ФСС— Me (где Me — металл) может быть удовлетворительно описана следующей формулой:

$$Q_{\text{зак}}(t) = \sum_{i=1}^3 Q_{0i} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_i Q_{inj}(t)}{q}\right) \right], \quad (1)$$

где в случае инжекции электронов из Si $Q_{03} = 0$, а в случае инжекции электронов из металлического электрода $Q_{02} = 0$.

На рис. 1 показаны энергетические зонные диаграммы МДП-структуры Si — SiO_2 —ФСС— Me , иллюстрирующие накопление отрицательного заряда в пленке ФСС при сильнополевой по Фаулеру — Нордгейму инжекции электронов из кремния (а) и металлического электрода (б). Как видно из рис. 1, часть инжектированных электронов захватывается на ловушках в пленке ФСС. Для упрощения описания на рисунке не показаны другие механизмы изменения зарядового состояния диэлектрической пленки SiO_2 —ФСС, которые протекают при сильнополевой инжекции. К таким механизмам относятся: накопление положительного заряда в диэлектрической пленке у границы Si — SiO_2 , повышение плотности

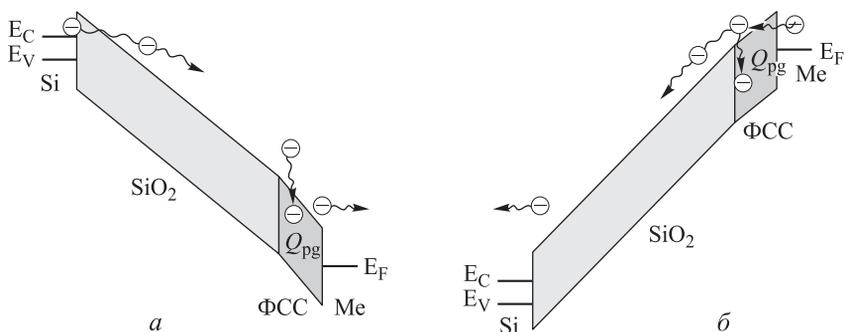


Рис. 1. Энергетические зонные диаграммы, характеризующие зарядовую модификацию МДП-структуры с подзатворным диэлектриком SiO_2 —ФСС при инжекции электронов из кремния Si (а) и при инжекции электронов из металлического затвора (б)

поверхностных состояний, накопление отрицательного заряда в объеме SiO_2 и др. [12, 19]. Важным условием сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур с пленкой SiO_2 —ФСС является минимизация других механизмов изменения зарядового состояния диэлектрической пленки, помимо накопления отрицательного заряда в ФСС, что достигается совершенствованием технологии формирования многослойного диэлектрика и подбором режимов инжекции.

На рис. 2 приведено изменение напряжения на МДП-структуре Si — SiO_2 —ФСС— Al в процессе туннельной инжекции электронов из кремния (1, 2, 3) и алюминия (1', 2', 3') в зависимости от величины инжектированного заряда для образцов различных групп (см. табл. 1). Поскольку центроид отрицательного заряда, накапливаемого в пленке ФСС, находится значительно дальше дистанции туннелирования от границы Si — SiO_2 , то при инжекции электронов из кремния он оказывает практически одинаковое влияние на сдвиги напряжения плоских зон и ΔV_I . При инжекции электронов из алюминиевого электрода накапливаемый в ФСС отрицательный заряд приводит к значительным приращениям ΔV_I (см. рис. 2, кривые 1', 2', 3'), которые почти на порядок превосходят приращение напряжения плоских зон [12]. Различия в величинах ΔV_I и приращения напряжения плоских зон определяются отношением расстояний от центроида отрицательного заряда до границ раздела Si — SiO_2 и ФСС— Al соответственно [19]. Таким образом, измеряя приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_I , можно контролировать изменение зарядового состояния образца в процессе инжекции электро-

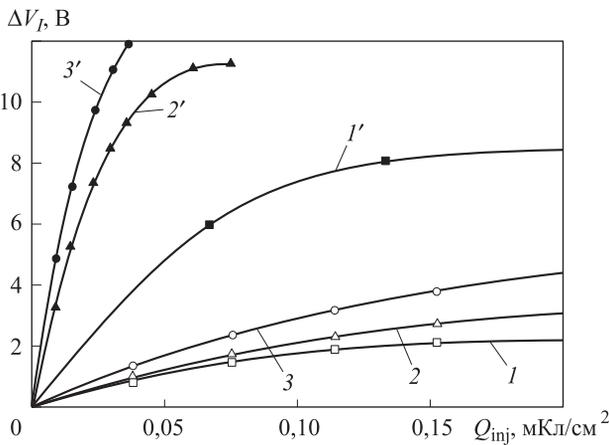


Рис. 2. Зависимости приращения напряжений на МДП-структуре в процессе туннельной инжекции электронов из кремния (1, 2, 3) и алюминия (1', 2', 3') от величины инжектированного заряда для образцов различных групп (табл. 1): II — (1, 1'); III — (2, 2'); IV — (3, 3')

нов при любой полярности токового импульса, что позволяет проводить прецизионную корректировку пороговых напряжений МДП-приборов.

Установлено, что при инжекции электронов из Al-электрода накопление отрицательного заряда может происходить лишь до определенной величины, при превышении которой за счет увеличения локального электрического поля в диэлектрической пленке [12] происходит пробой диэлектрика. Таким образом, при отрицательной полярности Al-электрода на исследуемых образцах инжекция электронов позволяла увеличивать пороговое напряжение МДП-транзистора до 1 В, а с возрастанием концентрации фосфора в пленке ФСС уменьшалась требуемая величина инжектированного заряда для одного и того же изменения зарядового состояния МДП-структуры.

При инжекции электронов из кремния с увеличением концентрации фосфора и ростом толщины слоя ФСС увеличивается диапазон возможных изменений порогового напряжения МДП-транзисторов. Однако для обеспечения приемлемых значений плотности поверхностных состояний величина инжектированного заряда при корректировке порогового напряжения не должна превышать $0,3 \text{ мКл/см}^2$. Диапазон токового воздействия при изменении зарядового состояния МДП-приборов целесообразно ограничить $10^{-7} \dots 10^{-5} \text{ А/см}^2$. Уменьшение амплитуды токового воздействия сопровождается трудностями технической реализации и нецелесообразно в связи со значительным возрастанием времени инжекции требуемой величины заряда. Увеличение плотности инжекционного тока приводит к значительному возрастанию вероятности пробоя образца, а также к повышению плотности поверхностных состояний и генерации положительного заряда в SiO_2 [1,12] при инжекции электронов из Si.

Для исследования влияния концентрации фосфора на изменение зарядового состояния МДП-структур Si—SiO₂—ФСС—Al для всех семи групп образцов осуществлялась инжекция электронов из кремния импульсами постоянного тока. Установлено, что в диапазоне токовых нагрузок от 10^{-7} до 10^{-5} А/см^2 наблюдается накопление отрицательного заряда. Кинетика изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика определяется в основном величиной заряда, инжектированного в диэлектрик [1, 6].

На рис. 3 представлены зависимости приращения напряжения на МДП-структуре при туннельной инжекции электронов из кремния импульсом тока $j_0 = 1 \text{ мкА/см}^2$ от величины инжектированного заряда для семи групп образцов. Из рисунка видно, что кинетика увеличения ΔV_f и его величина на участке насыщения пропорциональны концентрации фосфора.

Прерывая процесс инжекции через определенные промежутки времени (процесс прерывания не влиял на вид экспериментальных зави-

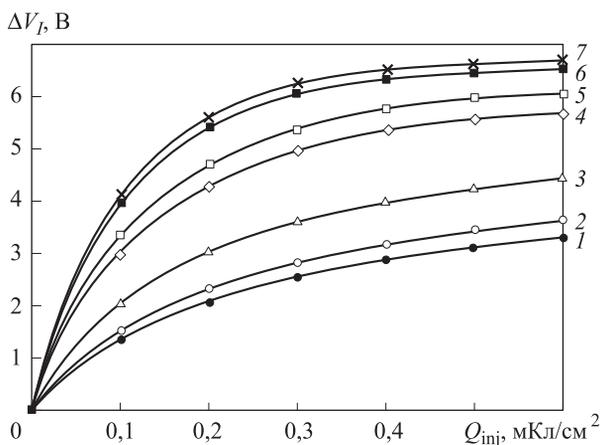


Рис. 3. Зависимость приращения напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния импульсом тока $j_0 = 1$ мкА/см² от величины инжектированного заряда для образцов различных групп (см. табл. 1): I — (1); II — (2); III — (3); IV — (4); V — (5); VI — (6); VII — (7)

симостей), измеряли сдвиг напряжения плоских зон ΔV_{FB} по $C-V$ характеристикам и величину изменения напряжения на образце при инжекции той же плотностью тока при отрицательной полярности Al-электрода $\Delta V_A(-)$. Зависимости ΔV_{FB} имели вид, близкий к кривым, изображенным на рис. 3. Это свидетельствует об однородном протекании инжекционного тока по площади МДП-структуры [12].

С учетом экспериментальных зависимостей ΔV_I и $\Delta V_A(-)$ проводили расчет центроида и плотности отрицательного заряда, накапливаемого в диэлектрической пленке при инжекции электронов из Si. Результаты расчета центроида заряда для всех семи групп образцов приведены в табл. 1.

Анализируя экспериментальные данные, сведенные в табл. 1, можно сделать вывод, что ответственным за накопление отрицательного заряда в МДП-структуре Si—SiO₂—ФСС—Al является пленка ФСС. Причем плотность накапливаемого отрицательного заряда возрастает с увеличением концентрации фосфора в ФСС.

Термополевая стабильность отрицательного заряда, захватывающегося в пленке ФСС при модификации параметров МДП-приборов, имеет первостепенное значение, поскольку определяет надежность и долговечность работы приборов. Для оценки термополевой стабильности отрицательного заряда после модификации зарядового состояния МДП-структур проводилось измерение токов ТСД при скорости роста температуры 0,2 К/с. На рис. 4 приведены кривые тока ТСД для структур, не подвергавшихся модификации (1), и после модификации импульсом тока положи-

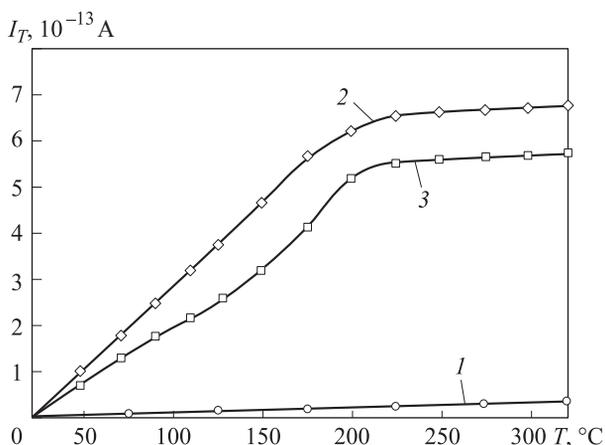


Рис. 4. Температурные зависимости токов ТСД для структур, не подвергавшихся модификации (1), и после модификации импульсом тока положительной (2) и отрицательной (3) полярности

тельной (2) и отрицательной (3) полярности. Заряд, инжектированный при модификации, составлял около $0,1 \text{ мКл/см}^2$.

Кривые токов ТСД, изображенные на рис. 4, имеют два характерных участка возрастания тока, первый из которых заканчивается при температуре около 200 °C . Аналогичные результаты по стеканию отрицательного заряда дали измерения релаксации отрицательного заряда при температурах 100 и 200 °C , причем на релаксацию отрицательного заряда в изотермических условиях замыкание электродов не оказывало значительного влияния.

Таким образом, при туннельной инжекции электронов в сильных электрических полях отрицательный заряд, захватывающийся в пленке ФСС, можно разделить на две компоненты, одна из которых стекает при отжиге до 200 °C , а другая — термостабильная часть заряда, которая начинает релаксировать лишь при температурах выше 230 °C . На наличие двух компонент отрицательного заряда указывает и присутствие в пленке ФСС электронных ловушек с двумя сечениями захвата [19]. Термостабильная часть отрицательного заряда в пленке ФСС наблюдалась также при ультрафиолетовом облучении структур, проводимом в [18].

Проведенные оценочные расчеты постоянной времени релаксации отрицательного заряда с высокой термополевой стабильностью в диапазоне рабочих температур МДП-приборов, проведенные с учетом кривых токов ТСД и результатов релаксации $C-V$ характеристик в изотермических условиях, дали значение более $4 \cdot 10^8 \text{ с}$. Следовательно, для получения МДП-приборов с высокой температурной стабильностью после коррекции зарядового состояния структур их необходимо отжи-

гать при температурах не ниже 200 °С, а модификацию характеристик проводить с учетом стекания части заряда при отжиге.

Для определения величины термостабильной компоненты накопленного в диэлектрике отрицательного заряда после инжекционной модификации МДП-структуры подвергались отжигу при температуре 200 °С в течение 20 мин. На рис. 5 показаны зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе модификации сильнополевой инъекцией из кремния (1, 2) и после отжига при 200 °С (1', 2') от плотности инжектированного заряда для образцов III и IV группы (табл. 1). Как видно из рис. 5, повышение концентрации фосфора в пленке ФСС приводит как к возрастанию плотности захваченного в диэлектрике отрицательного заряда (кривая 2), так и увеличению термостабильной компоненты отрицательного заряда (кривая 2').

Аналогичный характер имели изменения зависимостей приращения напряжения на МДП-структуре в процессе модификации и после отжига при 200 °С для всех семи групп образцов, приведенных в табл. 1. При отжиге инжекционно-модифицированной МДП-структуры в течение 20 мин при 200 °С релаксировало около 50% отрицательного заряда, и дальнейший отжиг практически не оказывал влияния на изменение зарядовых характеристик образца. Проведение даже кратковременного отжига в течение 5 мин при температуре 100 °С уменьшало плотность поверхностных состояний модифицированной структуры до значений, имевшихся до модификации.

Таким образом, проведенные исследования указывают на перспективность использования сильнополевой туннельной инъекции для мо-

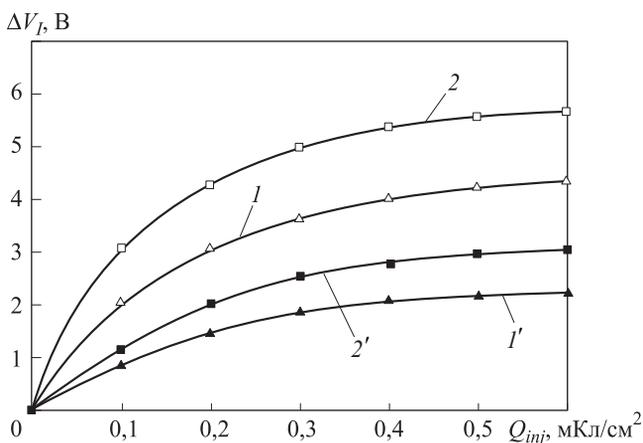


Рис. 5. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе модификации (1, 2) и после отжига при 200 °С (1', 2') от плотности инжектированного заряда для образцов различных групп (см. табл. 1): III — (1, 1'); IV — (2, 2')

дификации полевых приборов на основе МДП-структур с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 —ФСС. Установлено, что плотность как накапливаемого отрицательного заряда, так и его термостабильной компоненты возрастает с увеличением концентрации фосфора в ФСС. Однако использование для инжекционно модифицируемых МДП-структур пленок ФСС с концентрацией фосфора более 2% нецелесообразно, поскольку наряду с захватом отрицательного заряда в сильных электрических полях становятся заметными процессы поляризации диэлектрика, сопровождающиеся деградацией электрофизических характеристик приборов. Увеличение времени загонки фосфора в пленку SiO_2 , вызывает снижение инжекционной стойкости МДП-структур и повышение дефектности подзатворного диэлектрика. Помимо этого, в настоящее время толщина подзатворных оксидов постоянно уменьшается, и использование толстых пленок ФСС не представляется возможным. Следовательно, увеличение диапазона коррекции порогового напряжения МДП-транзисторов целесообразно проводить, управляя соотношением между толщиной диоксида кремния и ФСС, смещая центроид отрицательного заряда к границе раздела Si — SiO_2 . Все это указывает на необходимость совершенствования технологии получения слоев ФСС. Особенно это актуально для тонких подзатворных диэлектриков толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров.

Выводы. 1. Установлено, что отрицательный заряд, накапливающийся в пленке ФСС в МДП-структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 —ФСС в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, может использоваться для модификации электрофизических характеристик приборов с такой структурой. Предложен способ модификации электрофизических характеристик МДП-структур путем сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик в режиме протекания постоянного инжекционного тока. Способ позволяет непосредственно во время модификации контролировать изменение параметров структуры и, с учетом стекания части заряда при последующем отжиге, проводить прецизионную корректировку порогового напряжения МДП-транзисторов.

2. На основе измерения токов термостимулированной деполяризации и изотермической релаксации C — V характеристик при нескольких фиксированных температурах установлено, что при сильнополевой по Фаулеру — Нордгейму туннельной инжекции электронов в МДП-структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 —ФСС накапливаемый отрицательный заряд состоит из двух компонент. Первая компонента обладает низкой термополевой стабильностью и практически полностью стекает при отжиге $200\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 мин. Остав-

шаяся после отжига термостабильная компонента отрицательного заряда начинает релаксировать лишь при температурах выше 230 °С и может использоваться для корректировки порогового напряжения и получения приборов с высокой термополевой стабильностью. Оценочные расчеты постоянной времени релаксации термостабильной компоненты отрицательного заряда, остающейся после такого отжига, в диапазоне рабочих температур МДП-приборов дали значения более $4 \cdot 10^8$ с.

3. Установлено, что как плотность накапливаемого отрицательного заряда, так и плотность его термостабильной компоненты возрастает с увеличением концентрации фосфора в ФСС. Однако с повышением концентрации фосфора возрастает толщина пленки ФСС, что неприемлемо для тонких подзатворных диэлектриков, и сильнее проявляются деградационные процессы при воздействии сильнополевой инжекции. Следовательно, увеличение диапазона коррекции электрофизических параметров МДП-приборов более предпочтительно менять соотношением между толщиной диоксида кремния и ФСС, смещая центр оид отрицательного заряда к границе раздела Si—SiO₂.

Работа выполнена в рамках реализации проектов Министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high-fields. *Vacuum*, 2002, vol. 67/3–4, pp. 507–511.
- [2] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures. *Thin solid films*, 2003, vol. 427, pp. 377–380.
- [3] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Vasyutin D.S., Mikhal'kov A.M. Influence of High Field Electron Injection Regimes on Modification of Dielectric Films of MOS Devices. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 105–109.
- [4] Зайцев Н.А., Красников Г.Я., Неустроев С.А. Воздействие паров PCl₃ на свойства структур Si-SiO₂. *Изв. АН СССР: Неорган. Материалы*, 1989, т. 25, № 3, с. 403–405.
- [5] Mikhailovskii I.P., Potapov P.V., Epov A.E. Sign of the charge accumulated in thermal films of silicon MIS structures under high electric field condition. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1986, vol. 94, pp. 679–685.
- [6] Солдатов В.С., Воеводин А.Г., Коляда В.А. Модель генерации поверхностных состояний в МДП-структурах при туннельной инжекции. *Поверхность*, 1990, № 7, с. 92–97.
- [7] Balk P., Eldridge J.M. *Phosphosilicate glass stabilization of FET devices*. *Proc. IEEE*, 1969, vol. 57, pp. 1558–1563.
- [8] Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, pp. 121–301.

- [9] Гриценко В.А., Тысченко И.Е., Попов В.П., Перевалов Т.В. *Диэлектрики в наноэлектронике*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2010, 258 с.
- [10] Afanas'ev V.V., Stesmans A. Internal photoemission at interfaces of high-k insulators with semiconductors and metals. *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 102, pp. 81–301.
- [11] Андреев В.В., Барышев В.Г., Сидоров Ю.А., Столяров А.А. Влияние концентрации фосфора в пленках SiO₂ на характеристики МДП-систем. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 1993, вып. 3, с. 56–59.
- [12] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции. *Микроэлектроника*, 1997, № 6, с. 640–646.
- [13] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Метод многоуровневой токовой нагрузки для исследования генерации и релаксации положительного заряда в МДП-структурах. *Микроэлектроника*, 2003, т. 32, № 2, с. 152–158.
- [14] Андреев В.В., Столяров А.А., Дмитриев В.Г., Романов А.В. Инжекционные методы контроля подзатворного диэлектрика МДП-ИМС. *Научные технологии*, 2012, т. 13, № 10, с. 20–28.
- [15] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 12–17.
- [16] Булушева М.А., Попов В.Д., Протопопов Г.А., Скородумова А.В. Физическая модель процесса старения МОП-структуры. *Физика и техника полупроводников*, 2010, т. 44, вып. 4, с. 527–532.
- [17] Гороховатский Ю.А. *Основы термодеполяризационного анализа*. Москва, Наука, 1981, 176 с.
- [18] Левин М.Н., Гитлин В.Р., Татаринцев А.В., Остроухов С.С., Кадменский С.Г. Рентгеновская корректировка пороговых напряжений в производстве МДП интегральных схем. *Микроэлектроника*, 2002, т. 31, № 6, с. 408–413.
- [19] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Дегтярев В.Т., Столяров А.А., Драч В.Е. Исследование процессов сильнополевой инжекционной модификации и деградации МДП-структур. *Перспективные материалы*, 2004, № 2, с. 20–26.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев В.В., Столяров А.А., Ахмелкин Д.М., Романов А.В. Сильнополевая инжекционная модификация наноразмерных диэлектрических пленок в МДП-приборах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/802.html>

Андреев Владимир Викторович родился в 1963 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1988 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал. Автор более 160 научных публикаций в области микроэлектроники и физики полупроводников и диэлектриков. e-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Столяров Александр Алексеевич родился в 1956 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1979 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал. Автор более 180 научных публикаций в области микроэлектроники и физики полупроводников и диэлектриков. e-mail: p1kf@bmstu-kaluga.ru

Ахмелкин Дмитрий Михайлович родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Аспирант кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал. Автор 5 научных публикаций в области микроэлектроники и физики полупроводников и диэлектриков. e-mail: p1kf@bmstu-kaluga.ru

Романов Андрей Владимирович родился в 1978 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2001 г. Аспирант кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал. Автор 8 научных публикаций в области микроэлектроники и физики полупроводников и диэлектриков. e-mail: p1kf@bmstu-kaluga.ru